

Diss. ETH Nr. 10194

**Tectonics of the Higher- and Tethyan Himalaya, Upper Kaghan
Valley, NW Himalaya, Pakistan:
Implications of an early collisional, high pressure
(eclogite facies) metamorphism to the Himalayan belt**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

Presented by:

David A. Spencer

Master of Science, University of London, Great Britain

Born: 7 November, 1963
in Stepney, London, Great Britain

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. John G. Ramsay, Referee

Prof. Dr. Giorgio Martinotti, Co-referee

Zürich, 1993

Abstract

The Upper Kaghan Nappe is tectonically situated in the western syntaxis area of the Northwest Himalaya, NE Pakistan. It belongs to the Higher Himalaya and, as such, it is here delimited by the Main Central Thrust at its base and the Indus Suture at its structurally highest position. The nappe is suggested to be unusual from the generally accepted concepts of other known regions of the Higher Himalaya. Stratigraphically, the Higher Himalaya basement (granite intruding into minor, older metasediments) is overlain by two Tethyan lithological covers (Lower Paleozoic to Triassic?) which were also metamorphosed during the Himalayan orogen. Structurally, numerous macrostructural measurements (planar, planar-linear, folds, faults etc.) define at least two major phases of deformation - the first associated with the nappe forming event and the latter deforming the recumbent folds to form a superposed type 1 or 3 interference pattern. Very high strain can be recorded associated with the early ductile deformation. The Indus suture shows only evidence of a late-stage "top-to-the-south" thrust sense of shear, although this is suggested to overprint an earlier extensional movement along the suture zone. This, and the late-stage interference folds (suggested to act as a mechanism for increased erosion by advancing relative uplift), act as the exhumation processes for one of the most unusual features that have been found in Upper Kaghan: the eclogites.

The eclogites of Upper Kaghan show X_{Jd} contents of omphacite of up to 0.431, which retrogress to diopside. All garnets are almandine-rich ($X_{\text{alm}} = 0.460 - 0.592$) and co-exist with sodic-calcic and alkalis amphiboles, phengite and rutile. Garnet - clinopyroxene Fe^{2+} - Mg exchange thermometry calculates a mean temperature of formation of $650^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$. Garnet - phengite (Fe^{2+} - Mg) exchange thermometry suggests $658^{\circ}\text{C} \pm 17^{\circ}\text{C} - 676^{\circ}\text{C} \pm 38^{\circ}\text{C}$. The jadeite + quartz and the phengite Si^{4+} barometer indicates pressures up to 17.5 kbar, suggesting depths of formation of some 61 km, the deepest known rocks yet to be found that were exhumed by the Himalayan orogenesis. Retrogressive exhumation took place at decreasing temperatures. Three stages of metamorphism are suggested: M1 - rapid increase of pressure and temperature associated with the subducting Indian plate; M2 a decompressional event with decreasing pressure and temperature associated with a stable geotherm; M3 a retrogressive phase associated with overprinted greenschist facies metamorphism. The metamorphic conditions in the nappe are not constant with evidence of isothermic but non-isobaric gradients from the core to the outer sheets of the nappe.

Cathodoluminescence observations on the carbonates of the second Tethyan cover show that at least part of the calcite is not the product of dolomite decarbonation but that tremolite and diopside are closely related to the existing calcite composition. Sedimentary structures only seen in cathodoluminescence suggests a shallow shelf sea environment of formation for the Panjal trap carbonates. XRD calculations of the mineralogical content of the carbonates distinguish between the stratigraphic lower calcite-rich carbonates and the stratigraphic higher dolomite-rich samples, although the "Permian Carbonates" contain minor calcian dolomite with low ($\text{Mg}_{39}\text{Ca}_{61}$) contents.

Geochemically, the basement feeder and cover flow eclogites and amphibolites (as well as the Lesser Himalayan and the unmetamorphosed Panjal Traps) show remarkable similar element abundances and discriminate to tholeiitic (to sub-alkalic), within plate, continental flood basalts. The Higher Himalayan basement is a peraluminous, "S"-type granite forming in a within-plate environment with signatures that closely correlate to the Manshera granite. The peraluminous Higher Himalayan leucogranites show many similarities with the Higher Himalayan basement and appear to be derived from the basement granites.

$\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotopes on the carbonates of the Higher Himalaya second cover of Upper Kaghan show a distinctive chemo-stratigraphical trend between the known and suggested Permian / Triassic sequences, suggesting stratigraphic affiliation. With variations in the increase of the grade in metamorphism, both show a regular successive depletion in the means from a $\delta^{13}\text{C}$ of $+2.3\text{‰}$ to -1.5‰ PDB and $\delta^{18}\text{O}$ of $+20.3\text{‰}$ to $+16.7\text{‰}$ SMOW. Isotope depletion ratios essentially depend on carbonate mineralogical content. Negative shifts of carbon isotopes at the Permian - Triassic boundary of Zaskar are also found.

Radioactive isotope ages of samples from the Upper Kaghan nappe are: $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ analysis of garnet and clinopyroxene in eclogite gives an age of 49 ± 6 Ma ($\epsilon_{\text{Nd}} = +2.6$); $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ analysis of phengite, garnet and clinopyroxene in eclogite gives an age of 43 ± 1 (initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.70900 ± 0.00004); $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ analysis of rutile in eclogite gives ages of $39 - 40 \pm 1$ Ma; $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ analysis of hornblende and

biotite in amphibolite and eclogite range from 35.2 ± 1.4 Ma to 42.7 ± 1.4 Ma for hornblende and 26.3 ± 0.7 Ma for biotite. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ analysis of phengite and amphibole in eclogite suggests that excess argon was incorporated as they define ages of >106 Ma for amphibole and 81 Ma for phengite. Caution is suggested when using the $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ method for high pressure samples. $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ whole rock analysis of basalts, metabasalts, amphibolites, amphibolite-eclogites and eclogites, which pertain to give the extrusion age of the Panjal Traps, are 337 Ma ($\epsilon_{\text{Nd}} = +3.2$) although the M.S.W.D. is high. Whole rock $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ analyses of the amphibolites and eclogites of Upper Kaghan (and the Panjal Traps of the Lesser Himalaya and Zaskar) identifies them as tholeiitic continental flood basalts. $\epsilon_{\text{Nd}} t = 270$ varies between -9.9 to +4.9 with the more positive values occurring at the higher metamorphic grades. Minor continental crust contamination is present with a mixing curve evolution. Whole rock initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios range from 0.70559 ± 3 to 0.71643 ± 4 (with one exceptionally high 0.73829 ± 3) again suggesting signatures that evolved through the continental crust as tholeiitic, continental flood basalts. Using these new and published literature data, the cooling history of the Upper Kaghan nappe is determined at 13° - $14^\circ\text{C}/\text{Ma}$. Structural subdivisions of the nappe by core and outer sheet indicate a "rapid - slow - rapid" cooling history rather than a constant cooling history as determined for the nappe as a whole. The cooling history of Upper Kaghan is very different to that of the Nanga Parbat and Besham areas. It is also very different to the East Central Kohistan Island arc.

Fluid inclusion studies on the eclogites and quartzites in upper Kaghan show the presence of three systems of secondary inclusions: $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$, $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$ and CO_2 . Isochore calculations show that they were all the product of late stage metamorphic retrogression that lead to the liberation of CO_2 and H_2O which formed in an early less dense phase followed by a late higher density phase.

Tectonically, the Upper Kaghan nappe shows variation in exhumation rates from the outer sheet to the core of 0.75 - 1.3 mm/year. It is related to a model of anti-clockwise change in the tectonic transport direction which has been earlier ascribed to the structural evolution of the Hazara-Kashmir and Kaghan syntaxis. The finding of this early, high pressure phase of eclogite facies metamorphism renews speculations that an initial Indian plate impingement occurred in the Northwest Himalayan region at around 65 Ma and that successive west - east suturing of the Indian and Asian plate continents occurred subsequently in the Central and Eastern Himalaya.

Zusammenfassung

Die Obere Kaghan Decke liegt tektonisch in der westlichen "syntaxes" des NW Himalayas, NO Pakistan. Sie gehört zum Höheren Himalaya und ist deswegen von der zentralen Hauptüberschiebung an der Basis und von der Indus Suture auf ihre höchste strukturelle Position begrenzt. Für die allgemein akzeptierten Konzepte über den Höheren Himalaya ist die Decke eher ungewöhnlich. Das Höhere Himalaya Grundgebirge (intrusiver Granit in Metasedimenten) wird stratigraphisch von zwei Tethyschen lithologischen Decken (Untere Paläozoikum - Trias?) überlagert, die auch während der himalaya Orogenese metamorph überprägt wurden. Mehrere makrostrukturelle Messungen (planare, plano-lineare Strukturen, Falten, Brüche, usw.) bestimmen wenigstens zwei Hauptdeformationphasen: die erste wird mit der Deckenbildung assoziiert und die letzte deformiert liegende Falten zur Bildung von einem Typ 1 oder 3 Interferenzmuster. Eine sehr hohe Verformung ist mit der früheren duktilen Deformation verbunden. Die Indus Suture zeigt nur eine späte südwestliche Scherungsrichtung, obwohl vorgeschlagen wird, dass diese eine frühere Dehnungsbewegung entlang der Suture überprägt. Die Dehnung wirkt, zusammen mit den Interferenzfalten die durch fortgeschrittene Hebung zu zunehmender Erosion führen, als Exhumierungsprozess für eine der aussergewöhnlichsten Merkmale, die im Höheren Kaghan gefunden wurden: die Eklogite.

Die Eklogite des Höheren Kaghans zeigen einen Jadeit-Inhalt in Omphazit bis 0.431, der zu Diopsid zerfällt. Alle Granate sind Almandin-reich (0.460 - 0.592) und koexistieren mit Natrium-Kalzium- und Alkali-Amphibolen, Phengit und Rutil. Fe-Mg-Tauschthermometrie in Granat-Klinopyroxen gibt eine mittlere Bildungstemperatur von $650 \pm 50^\circ\text{C}$. Fe-Mg-Tauschthermometrie in Granat-Phengit gibt Temperaturen zwischen $658 \pm 17^\circ\text{C}$ und $676 \pm 38^\circ\text{C}$. Der Jadeit+Quarz-Barometer und der Si^{4+} -Inhalt in Phengit geben Druckwerte bis zu 17.5 kbar, die eine Bildungstiefe von etwa 61 km entsprechen; d.h. die Eklogite sind die tiefsten bis jetzt gefundenen Gesteine, die von der himalaya Orogenese exhumiert wurden. Eine retrograde Exhumation hat unter abnehmenden Temperaturen stattgefunden. Drei Metamorphosephasen werden vorgeschlagen: M1 - rasche Zunahme von Druck und Temperatur, die mit der Subduktion der indische Platte verbunden ist; M2 - abnehmender Druck und Temperatur; M3 - eine überprägende retrograde Phase in Grünschieferfazies. Die metamorphen Bedingungen der Decke sind nicht konstant, zeigen aber Wärme- und Druckgradienten vom Deckenkern zu den äusseren Schichten.

Die Kathodenlumineszenz der Karbonate, der zweiten tethischen Sedimentdecke zeigt, dass das Kalzit, wenigstens zum Teil, nicht das Produkt von Entkalkung des Dolomites ist. Tremolit und Diopsid sind chemisch mit der Zusammensetzung des koexistierenden Kalzit verbunden. Die Beobachtung von Sedimentstrukturen deutet auf ein Tiefseemilieu für die Panjal Trap Karbonate hin. Die mineralogische Zusammensetzung zeigt, dass die stratigraphisch älteren Sedimente eher kalzitreich sind, während die stratigraphisch jüngeren Karbonate dolomitreich sind, obwohl die permische Karbonate wenig kalziumreichen Dolomit enthalten.

Die Eklogite und Amphibolite, die in Gängen im Grundgebirge und als Lavaströme beobachtet wurden, zeigen starke geochemische Ähnlichkeiten mit den Panjal Traps, die im Tieferen Himalaya in Grünschieferfazies und nicht metamorph in Zanskar zu finden sind. Sie "diskriminieren" zu tholeiitischen (bis sub-alkalischen), intra-Platten, kontinentalen Plateau-Basalten. Das Höhere Himalaya Grundgebirge ist ein aluminiumreicher, S-Typ, Granit, der sehr ähnlich wie der Manshera-Granit ist. Die aluminiumreiche Leukogranite des Höheren Himalayas zeigen mehrere Ähnlichkeiten zum Grundgebirge und wurden wahrscheinlich daraus gebildet.

Die $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ Verhältnisse wurden in den tethischen Karbonaten vom Höheren Kaghan gemessen und zeigen eine klare chemostratigraphische Korrelation zwischen den bekannten und vermuteten Permo-Triassischen Sequenzen. Beide Isotopenverhältnisse zeigen eine regelmässige Abnahme in den mittleren Werten mit zunehmendem metamorphen Grad ($\delta^{13}\text{C}$ von +2.3‰ bis -1.5‰ PDB; $\delta^{18}\text{O}$ von +20.3‰ bis +16.7‰ SMOW). Die Abnahme in den schweren Isotopen ist von der Karbonatmineralogie abhängig. Eine negative Verschiebung der Kohlenstoff-Isotopen Verhältnisse an der Permo-Triassische Grenze in Zanskar wurde identifiziert.

Radiometrische Altersbestimmungen der Gesteine der Kaghan Decke sind: $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ -Analysen von Granat und Klinopyroxen in Eklogit ergeben ein Alter von 49 ± 6 Ma ($\epsilon_{\text{Nd}} = +2.6$); $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ -

Analysen von Phengit, Granat und Klinopyroxen in Eklogit ergeben ein Alter von 43 ± 1 Ma (Anfangs- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70900 \pm 0.00004$); $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ -Analyse von Rutil in Eklogit hat ein Alter zwischen 39 und 40 Ma ± 1 ergeben; $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ -Altersbestimmungen von Hornblende und Biotit in Amphibolit und Eklogit sind zwischen 35.2 ± 1.4 und 42.7 ± 1.4 Ma für die Hornblende und 26.3 ± 0.7 Ma für die Biotit. Die $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -Analysen von Phengit und Amphibol in Eklogit zeigen einen übermässigen Anteil von Argon, da sie ein Alter von >106 Ma für Amphibol und 81 Ma für Phengit geben. Deshalb sollte man die $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -Methode in Hochdruckgesteinen mit einiger Skepsis sehen. Die $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ -Analysen (ganzes Gestein) der Basalte, Metabasalte, Amphibolite, Amphibolite-Eklogite, und Eklogite, die zum Alter der Extrusion der Panjal Trap Vulkanite führen sollten, geben ein Alter von 337 Ma ($\epsilon_{\text{Nd}} = +3.2$), obwohl der M.S.W.D. hoch ist. Die $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Analysen der Amphibolite und Eklogite von Höheren Kaghan (und der Panjal Vulkanite des Tieferen Himalaya und von Zanskar) identifizieren sie als kontinentale tholeiitische Basalte. $\epsilon_{\text{Nd}} t=270$ variiert zwischen -9.9 e $+4.9$, mit den positivsten Werten in höher metamorphen Gesteinen. Es gibt eine leichte Krustenkontaminierung. Die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte (ganzes Gestein) variieren zwischen 0.70559 ± 3 und 0.71643 ± 4 (mit einem einzigen, übermässig hohen Wert von 0.73829 ± 3) und gehören zu tholeiitische kontinentalen Basalten, die durch die Kontinentalkruste evolviert sind. Mit diesen und publizierten Daten konnte man die Abkühlungsrate der Kaghan-Decke auf $13\text{-}14^\circ\text{C}/\text{Ma}$ bestimmen. Die strukturelle Unterteilung der Decke in zwei Teile, einen internen und einen externen, deutet eher auf eine "rasche-langsame-rasche" Abkühlung hin, als auf eine konstante Abkühlung wie man von der gesamte Deckenevolution bestimmen konnte. Die Abkühlung der Kaghan-Decke ist ganz verschieden von dem was man für Nanga Parbat und Besham Gebiet berechnet hat. Sie unterscheidet sich auch vom östlichen-zentralen Kohistan-Inselbogen.

Die Untersuchung der Flüssigkeits Einschlüsse in den Eklogiten und Quarziten identifiziert drei Systeme von sekundären Einschlüssen: $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-NaCl}$, $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-CH}_4$ und CO_2 . Die Berechnung der Isochoren zeigt, dass alle Einschlüsse während einer späten metamorphen Regression erzeugt wurden. Diese Phase der Metamorphose befreite CO_2 und H_2O zuerst als dünnflüssige und später als dickflüssige Phase.

Tektonisch variiert die Exhumationsrate der Höheren Kaghan Decke zwischen 0.75 und 1.3 mm/Jahr vom externen Teil bis zum Kern. Das wird mit einer Linkswanderung des tektonischen Transports erklärt, der schon früher für die strukturelle Entwicklung der Hazara-Kashmir und Kaghan Syntaxis vorgeschlagen wurde. Die Funde des Hochdruck-Metamorphismus in der Eklogitfazies unterstützen die Annahmen, dass die indische Platte zuerst im nordöstlichen Teil des Himalayas vor etwa 65 Ma kollidiert ist, und dass erst später von Westen nach Osten der indische und asiatische Kontinent im zentralen und östlichen Himalaya kollidierten.

Riassunto

La falda della Valle di Kaghan superiore è situata tettonicamente nella zona di sintassi occidentale nell'Himalaya nordoccidentale, NE Pakistan. Fa parte dell'Alto Himalaya e, come tale, è delimitata dal Sovrascorrimento Centrale Principale alla base e dalla Sutura dell'Indo nella parte strutturalmente superiore. Questa falda è particolare se si considerano i concetti accettati generalmente per le altre regioni dell'Alto Himalaya. Stratigraficamente, il basamento (granitico intruso in metasedimenti più antichi) è ricoperto dalle due coperture litologiche della Tetide (di età paleozoica inferiore fino a triassica?) che sono state pure metamorfosate durante l'orogenesi himalayana. Strutturalmente, numerose misurazioni macrostrutturali (planari, plano-lineari, pieghe, faglie, etc.) definiscono almeno due fasi principali di deformazione: la prima associata con la formazione della falda e la seconda che deforma le pieghe rovesciate per formare una figura di interferenza di tipo 1 o 3. Uno stiramento molto elevato si trova associato alla deformazione duttile precoce. La Sutura dell'Indo mostra solo una tarda direzione di taglio con sovrascorrimento verso sud; si considera che questo movimento obliteri un movimento precedente di estensione lungo la zona di sutura. Questo processo, insieme alle pieghe di interferenza tardive (che si pensa abbiano agito come meccanismo di erosione accelerata per progressivo innalzamento relativo), funzionano come processi di esumazione per una delle particolarità più inusuali trovate nella Valle di Kaghan superiore: le eclogiti.

Le eclogiti del Kaghan superiore hanno un contenuto di jadeite nell'onfacite fino a 0.431, che retrocede in diopside. Tutti i granati sono ricchi di almandino (0.460 - 0.592) e coesistono con anfiboli sodico-calcici e alcalini, fengite e rutile. La termometria di scambio (Fe^{2+} -Mg) in granato-clinopirosseno dà una temperatura media di formazione di $650 \pm 50^\circ C$. La termometria di scambio (Fe^{2+} -Mg) granato-fengite suggerisce temperature da $658 \pm 17^\circ C$ a $676 \pm 38^\circ C$. Il barometro jadeite+quarzo ed il contenuto di Si^{4+} nella fengite indicano pressioni fino a 17.5 kbar, che suggeriscono profondità di formazione di circa 61 km, e confermano che le eclogiti sono le rocce più profonde finora trovate che sono state portate alla luce dall'orogenesi himalayana. Un'esumazione retrograda ha avuto luogo a temperature decrescenti. Si suggeriscono tre stadi di metamorfismo: M1 - aumento rapido di pressione e temperatura associato alla subduzione della placca indiana; M2 - un evento di decompressione associato a diminuzione di pressione e temperatura con una geoterma stabile; M3 - una fase retrograda associata con un sovrapposto metamorfismo a scisti verdi. Le condizioni metamorfiche nella falda non sono costanti con gradienti isotermici ma non-isobarici dal centro verso l'esterno della falda.

Osservazioni alla catodoluminescenza dei carbonati della seconda copertura di sedimenti della Tetide, mostrano che almeno parte della calcite non è il prodotto della decarbonatazione della dolomite, ma che tremolite e diopside sono strettamente legati alla composizione della calcite coesistente. Strutture sedimentarie visibili solo con la catodoluminescenza suggeriscono un ambiente di formazione di mare basso per i carbonati delle Vulcaniti del Panjal. Analisi del contenuto mineralogico dei carbonati con diffrattometria a raggi X permettono di distinguere tra i carbonati ricchi di calcite stratigraficamente inferiori, ed i sovrastanti carbonati ricchi in dolomite, anche se i carbonati permiani contengono pure piccole quantità di dolomite ricca di calcio.

Le eclogiti ed anfiboliti dei filoni nel basamento e delle colate di copertura (così come i metabasalti del Basso Himalaya e le Vulcaniti di Panjal non metamorfosate) hanno caratteristiche geochemiche simili, di basalti continentali di colata toleitici (o sub-alcalini). Il basamento dell'Alto Himalaya è granitico di ambiente intra-placca, di tipo "S", ad alto contenuto di alluminio, con caratteristiche che ricordano il granito di Manshera. I leucograniti ricchi di alluminio dell'Alto Himalaya mostrano molte similarità con il basamento dell'Alto Himalaya e sembrano derivare dai graniti del basamento.

Gli isotopi dell'ossigeno e del carbonio misurati nei carbonati della seconda copertura mostrano un andamento chemo-stratigrafico distinto tra le sequenze permo-triassiche conosciute e quelle presunte del Kaghan superiore e suggeriscono una correlazione stratigrafica. Con l'aumentare del grado di metamorfismo, entrambi i rapporti isotopici mostrano un regolare impoverimento nell'isotopo pesante ($\delta^{13}C$ da 2.3‰ a -1.5‰ PDB; $\delta^{18}O$ da +20.3‰ a +16.7‰ SMOW). Questo impoverimento dipende dalla mineralogia del carbonato. Il limite Permo-Triassico in Zanskar è segnato da un picco negativo di valori del carbonio.

Le età ottenute con i metodi isotopici radioattivi per le rocce della falda di Kaghan superiore sono

riassunte di seguito: analisi $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ del granato e clinopirosseno nell'eclogite danno un'età di 49 ± 6 Ma ($\epsilon_{\text{Nd}} = +2.6$); analisi $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ di fengite, granato e clinopirosseno in eclogite danno un'età di 43 ± 1 Ma ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iniziale = 0.70900 ± 0.00004); analisi $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ di rutile nell'eclogite dà età tra 39 e 40 Ma ± 1 ; analisi $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ di orneblenda e biotite in anfibolite ed eclogite variano tra 35.2 ± 1.4 e 42.7 ± 1.4 Ma per l'orneblenda e 26.3 ± 0.7 Ma per la biotite. Le analisi $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ di fengite ed anfibolo nell'eclogite indicano l'incorporazione di Ar in eccesso, visto che danno età > 106 Ma per l'anfibolo e di 81 Ma per la fengite. Si consiglia di fare attenzione nell'uso del metodo $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ per la datazione di rocce di alta pressione. Le analisi $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ in roccia totale di basalti, metabasalti, anfiboliti, anfiboliti-eclogiti ed eclogiti, che dovrebbero dare l'età di estrusione delle Vulcaniti di Panjal, danno un'età di 337 Ma ($\epsilon_{\text{Nd}} = +3.2$), anche se il M.S.W.D. è alto. Analisi di roccia totale $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ delle anfiboliti ed eclogiti del Kaghan superiore (e delle Vulcaniti di Panjal del Basso Himalaya e dello Zaskar) le identificano come basalti toleitiici di colata continentali. ϵ_{Nd} $t=270$ varia tra -9.9 e $+4.9$ con i valori più positivi nelle rocce di grado metamorfico più alto. È presente una leggera contaminazione crostale. I valori $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ di roccia totale variano tra 0.70559 ± 3 e 0.71643 ± 4 (con un valore isolato eccezionalmente alto di 0.73829 ± 3) e suggeriscono basalti toleitiici continentali, che si sono evoluti attraverso la crosta continentale. Utilizzando questi dati ed altri trovati nella letteratura, si è determinato il rapporto di raffreddamento della falda di Kaghan a $13-14^\circ\text{C}/\text{Ma}$. Suddivisioni strutturali della falda in due parti, una interna ed una esterna, indicano un raffreddamento "veloce - lento - veloce" piuttosto che un raffreddamento costante come si può determinare per la falda nel suo insieme. Il raffreddamento del Kaghan superiore è molto diverso da quello ottenuto per il Nanga Parbat e per la zona di Besham. Differisce anche da quello dell'Arco insulare del Kohistan.

Lo studio delle inclusioni fluide nelle eclogiti e quarziti nel Kaghan superiore mostra la presenza di tre sistemi in inclusioni secondarie: $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$, $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$ e CO_2 . Il calcolo dell'isocora dei sistemi mostra che sono tutti il prodotto della fase tarda, retrograda di metamorfismo che ha portato alla liberazione di CO_2 e H_2O , formati prima in una fase meno densa, seguita da una fase più densa.

Tettonicamente, la falda di Kaghan superiore mostra una variazione nella velocità di esumazione tra la parte esterna e quella interna da 0.75 a 1.3 mm/anno. Questo è interpretato con un modello di rotazione antioraria nella direzione di trasporto tettonico che è stato precedentemente imputato all'evoluzione strutturale della sintassi Hazara-Kashmir e Kaghan. La scoperta del metamorfismo di alta pressione in facies eclogitica rinnova le speculazioni su una collisione iniziale della placca indiana nella zona dell'Himalaya nordoccidentale circa 65 milioni di anni fa e della successiva collisione del continente indiano e di quello asiatico da ovest verso est nell'Himalaya centrale ed orientale.